

## 京都大学自由電子レーザー施設の現状

### PRESENT STATUS OF FREE ELECTRON LASER FACILITY AT KYOTO UNIVERSITY

全炳俊<sup>#</sup>, Krainara Siriwan, 紀井俊輝, 大垣英明  
Heishun Zen<sup>#</sup>, Siriwan Krainara, Toshiteru Kii, Hideaki Ohgaki  
Institute of Advanced Energy, Kyoto University

#### Abstract

An oscillator-type mid-infrared Free Electron Laser (FEL) named KU-FEL has been developed at the Institute of Advanced Energy, Kyoto University for energy related researches. Recently, a THz coherent undulator radiation source driven by a compact-accelerator using a photocathode RF gun has been developed. In this paper, the present statuses of those light sources are reported.

#### 1. はじめに

京都大学エネルギー理工学研究所では、エネルギー関連研究への応用を目指し、中赤外自由電子レーザー装置 (Kyoto University Free Electron Laser, KU-FEL, Figure 1)を開発してきた[1, 2]。これまでに、波長 3.5~23  $\mu\text{m}$  での発振に成功しており[3]、固体試料や薄膜のポンプ・プローブ分光[4-7]や生物試料への照射[8]等、幅広い応用実験に供されている。

KU-FEL 装置は周波数 2856 MHz のマイクロ波で駆動する 4.5 空洞高周波電子銃と 3 m 加速管、ビーム輸送部、アンジュレータ、光共振器により構成されている[1, 2]。Figure 1 に 2018 年 7 月現在の FEL 装置概略図を示す。2011 年 12 月には、JAEA の ERL-FEL にて使用されていた 1.8 m アンジュレータ[9]をそれまでに使用していたアンジュレータ[1]と交換すると共に、光陰極高周波電子銃の導入に向けて、FEL 光共振器長を従来の 4.514 m から 5.039 m へと変更した。この共振器長を光が往復するのに要する時間は既設モードロックレーザー発振器の繰り返し周波数 89.25 MHz の 3 周期分に当たる。また、それと同時に光共振器を再設計し、短波長での光取り出し損失が小さくなる様に上流ミラーに設けた光取り出し穴の穴径をこれまでの 2 mm から 1 mm へと小さくした。上記の更新と 2013 年度に行ったアンジュレータダクトの更新により、現在、波長 3.4-26  $\mu\text{m}$  において発振可能となっている。また、2013 年には、ビーム位置モニタとそれを用いた位置・エネルギー・加速管位相のフィードバック制御を本格的にユーザー運転に導入し、加速器の安定性が向上すると共に、日々の運転条件の再現性が向上している。

中赤外 FEL の開発に加えて、近年は光陰極高周波電子銃で発生させた電子バンチをバンチ圧縮器で圧縮し、1 ps 程度の短バンチにした後に、アンジュレータに入射する事で強い準単色 THz 光を発生させるコヒーレントアンジュレータ放射 (Coherent Undulator Radiation: CUR) 光源の開発も行っている[10, 11]。THz-CUR 光源の概略図も Fig. 1 に示した。THz-CUR 光源は専用の光陰極高周波電子銃を持つが、高周波源と光陰極駆動用レーザーを KU-FEL 用電子銃と共有している。2015 年

4 月に光陰極高周波電子銃からの電子ビーム発生に成功した。その後、2016 年 3 月にバンチ圧縮器の設置を完了、2016 年 4 月にコヒーレント遷移放射を用いたバンチ圧縮条件の確認を行った。そして、2016 年 7 月にアンジュレータの設置を完了し、2016 年 8 月にコヒーレントアンジュレータ放射の発生を確認した。

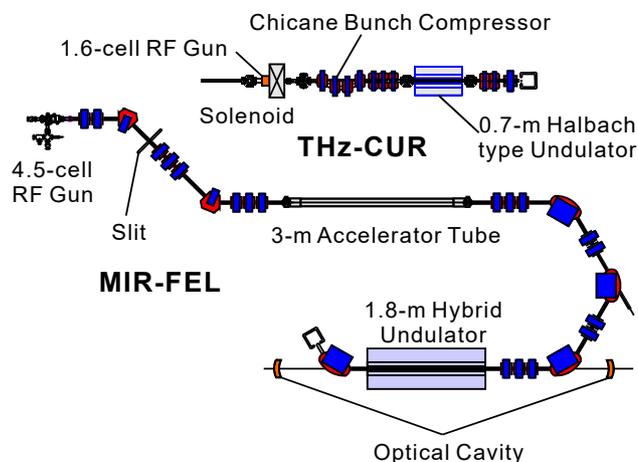


Figure 1: Layout of MIR-FEL and THz-CUR source in July 2018.

#### 2. 京都大学中赤外自由電子レーザーの性能

KU-FEL の 2019 年 7 月現在の性能を Table 1 に示す。強度は弱い最短波長 3.4  $\mu\text{m}$ 、最長波長 26  $\mu\text{m}$  での発振が確認されている。ユーザー利用ステーションにおける各波長でのマクロパルスエネルギーを Figure 2 に示す。2018 年度後期に、3.0~3.3  $\mu\text{m}$  と発振可能再短波長よりも短い波長を利用したいという内部ユーザーの希望があり、中赤外用非線形結晶 (ZnGeP<sub>2</sub>,  $\theta=48.8$  deg.  $\phi=0$  deg., 3 Photon 社製)を用いた二次高調波発生も行っている。水蒸気の吸収が比較的弱い 6.3  $\mu\text{m}$ 、マクロパルスエネルギー約 20 mJ の FEL を ZnGeP<sub>2</sub> に入射し、約 1.8 mJ/macro-pulse の二次高調波出力を得る事が可能であった。変換効率は約 9%であり、期待ほど高くない。この条件下でも入射側 ZnGeP<sub>2</sub> 表面の AR コートの損傷が生じており、これ以上、集光強度を上げて、変換効率を高めるのは難しそうである。変換効率は低い、この強度は基本波として 3.4  $\mu\text{m}$  を発生させた場合の 4 倍程度

<sup>#</sup> zen@iae.kyoto-u.ac.jp

の強度である。ただし、 $3.0\sim 3.3\ \mu\text{m}$  を発生させるために必要な基本波波長は  $6.0\sim 6.6\ \mu\text{m}$  であり、波長  $6.3\ \mu\text{m}$  以外の波長では非常に強い水蒸気の吸収が存在する。このため、この波長帯で自由に波長を変えて実験を行うためには、光輸送路のみならず、非線形結晶までの光路を窒素置換するなど、水蒸気の吸収による減衰を低減する必要あり、現在、検討を進めている所である。

Table 1: Performance of KU-FEL

Wavelength Range	3.4 – 26 $\mu\text{m}$
Max. Macro-pulse Energy*	41.8 mJ @4.9 $\mu\text{m}$
Typ. Macro-pulse Duration	2 $\mu\text{s}$
Max. Micro-pulse Energy*	7.3 $\mu\text{J}$ @4.9 $\mu\text{m}$
Micro-pulse Duration [12]	0.6 ps @12 $\mu\text{m}$
Typ. Bandwidth	3%-FWHM
Max. Extraction Efficiency [13]	5% @11.6 $\mu\text{m}$

\*Observed at user station 1 (after 12 m transport).

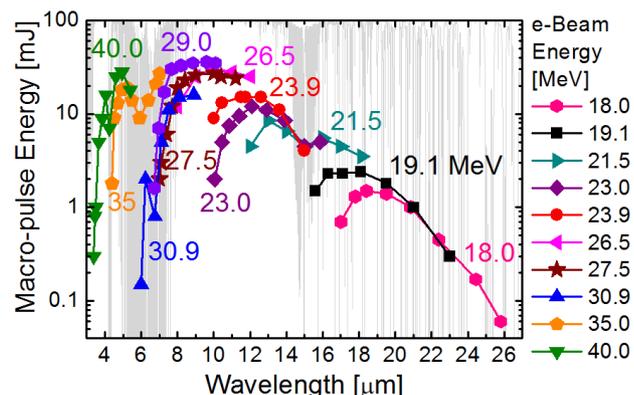


Figure 2: Macro-pulse energy of KU-FEL, which is available at the user station 1.

### 3. KU-FEL 稼働状況

Figure 3 に KU-FEL 駆動用電子線形加速器の 2018 年度における稼働状況を示す。総運転時間は 448 時間であった。放射線管理上の年間最大運転可能時間(960 時間)の約 47%であり、まだまだマシンタイムに余裕がある状況である。2018 年度は屋上防水改修工事が 2 月に予定されており、ユーザー実験時間確保のため、夏季シャットダウンを設けず、8 月、9 月にも装置の運転を行った。

Figure 4 に 2009 年度以降の総運転時間とユーザー利用時間の履歴を示す。2010 年度までは加速器の R&D がメインであったが、2011 年度から 2013 年度にかけてユーザー利用実験が増加した。2013 年度には、総運転時間の約 72%がユーザー利用実験に供された。2014 年度は THz-CUR 駆動用高周波電子銃増設作業や熱陰極高周波電子銃中熱陰極ヒータ通電用ラインの破断によるトラブルの為、運転時間が 400 時間を割り込んだが、2015 年度は更に運転時間が短くなり、255 時間となった。これは、高周波電子銃用クライストロンモジュレータのコンデンサ不良と内部ユーザーの利用時間が短くなったためである。2016 年度はまだ不良コンデンサの交換が終わっておらず、運転時間が延びなかったが、

2017 年度 4 月にコンデンサの全交換を終了した。2017、2018 年度と少しずつではあるが、総運転時間、ユーザー利用時間共に増加傾向にある。2018 年度には総運転時間の約 86%がユーザー利用実験に供された。

2019 年度は所外共同利用・共同研究の件数が 2018 年度の 10 件から 14 件に増加しており、ユーザー利用時間の更なる増加を見込んでいる。また、後述するが光源開発の新たなプロジェクトも開始され、運転時間の増加に拍車がかかると予測されている。その証拠に本年度に入ってから総運転時間は 7 月末時点で既に約 190 時間に上っており、昨年度の 7 月末時点の総運転時間約 106 時間を大きく上回っている。

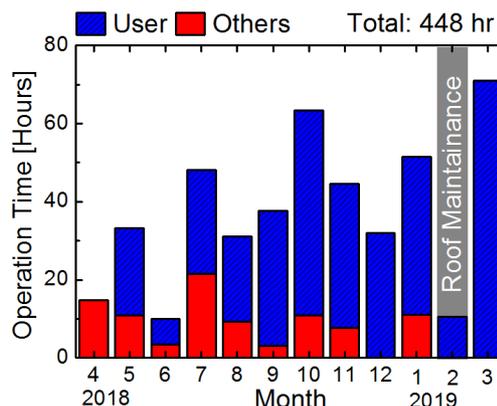


Figure 3: Operation time of KU-FEL facility in FY2018. The adjustment of accelerator, machine tuning for FEL lasing, study of the driver linac and FEL parameter measurements are included in “Others”.

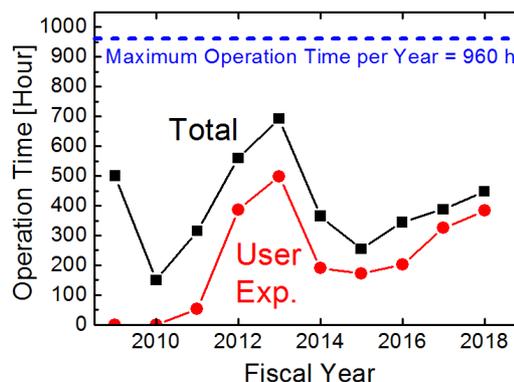


Figure 4: History of total operation time and user experiment time of KU-FEL since 2009. The maximum operation time per year is 960 hours, which is limited by radiation restriction.

### 4. トラブルおよび問題点

#### 4.1 高周波窓の真空漏れ

2013~2018 年度の年会でも報告したが、進行波型加速管の上流側の RF 窓から加圧時に SF<sub>6</sub> ガスが RF 窓を通して真空側に漏れるという問題が発生している。加速器室の室温と加速管部の真空度が強い相関を示しており、夏季に真空度が悪化する。交換用 RF 窓が調達

済みであるので、症状の推移をみて交換タイミングを決める予定である。

#### 4.2 電子銃用クライストロンモジュレータのサイラトロンノイズ増加

電子銃用クライストロンモジュレータの放電スイッチとして、サイラトロン(TRITON 社製 F-117)が用いられている。近年、放電時のノイズが増加すると共に、パルス毎のノイズの強度が不安定になるという現象が生じている。そして、このノイズ増加が原因と考えられる PFN 高圧充電電源の制御ボードの異常・故障が発生する様になった。幸い、予備のサイラトロンが一本あるので、PFN 製造メーカーと相談しながら交換する事を考えている。また、根本的な解決策として、クライストロンモジュレータの更新を考えており、大学本部への予算要求を行っている。

### 5. 施設整備状況

更により多くのユーザーに利用して頂ける様、加速器及び利用環境の整備を引き続き行っている。以下に案件毎に整理して述べる。

#### 5.1 光陰極高周波電子銃を用いた THz 光源開発

2009 年度に KEK の大学等連携支援事業の下、2009 年度に 1.6 空洞高周波電子銃(改良型 BNL Type Gun-IV)を製作したのに端を発し、これまで、継続して光陰極高周波電子銃を電子源として用いた THz コヒーレントアンジュレータ放射(THz-CUR)の開発を継続して行ってきた[14]。2017 年度は構成された THz 検出器を用いて、絶対強度測定を行い、その結果として周波数 170 GHz において、1 ミクロパルス当たり約 1.3  $\mu$ J、ピークパワー約 20 kW の 10 サイクル放射の発生に成功している事が確認された[15]。また、バンチ電荷に対する放射強度の依存性から、大電荷時に空間電荷効果の影響でパルス圧縮が上手くできなくなり、出力が飽和するという結果が得られている[15]。これを受けて、どの様にして、空間電荷効果の影響を低減し、大電荷条件で短いバンチ長を得るかの検討を行っている[16]。

#### 5.2 光陰極運転による KU-FEL の高ピークパワー化

2018 年度から光・量子飛躍フラグシッププログラム(Q-LEAP)、基礎基盤研究課題として、中赤外自由電子レーザー(FEL)で駆動する高繰り返し高次高調波発生(HHG)アト秒光源(FEL-HHG)の実現を目指し、量研、日大、KEK、京大エネ研のチームで研究開発を開始した。本プロジェクトでは、共振器型中赤外自由電子レーザーで発生させた高強度数サイクル中赤外光を希ガスに集光し、HHG を行い、アト秒 X 線発生を行う予定である。研究プロジェクトの構想や概要については、プロジェクトリーダーの羽島氏の発表を参照されたい[17]。KU-FEL では、既設の KU-FEL 施設をアップグレードする事で HHG 駆動に必要な高強度数サイクル中赤外光の発生を目指す。2018 年度には光陰極運転用陰極励起用レーザーシステムのアップグレードを行った[18]。本年度は中赤外 FEL のパルス長測定系の構築を進めると共に、アップグレードした光陰極励起用レーザーシステムを用いた FEL 発振実験や多層膜ミラーを用いた光共振器損失低減による引き出し効率および FEL 出力の増大実験な

どを計画している。また、新光陰極高周波電子銃の導入も考えており、より高いバンチ電荷の電子ビームを供給する事で、更に高い FEL ピークパワーの達成も計画している。

### 6. まとめ

京都大学中赤外自由電子レーザーは現在、当初の目標波長領域(5~20  $\mu$ m)を超える 3.4~26  $\mu$ m での発振が可能となっている。内部ユーザーの 3.0~3.3  $\mu$ m を利用したいという需要を満たすため、中赤外用非線形結晶(ZnGeP<sub>2</sub>)を用いた二次高調波発生も開始し、波長 3.15  $\mu$ m でマクロパルスエネルギー約 1 mJ を達成可能である事が確認されている。

昨年度の総稼働時間は 447 時間でその内の約 86% がユーザー利用実験に供された。2014 年 7 月より問題となっていた不良コンデンサの全交換が終了し、その後、問題なく運転が可能となっている。しかし、今後、安定的にユーザー利用を推進していく為には、開発初期段階で導入し、耐用年数を過ぎた機器の交換や更新が必要となってくると考えられる。

一方、光陰極励起用レーザーの整備が進み、光陰極高周波電子銃を用いた THz 光源開発や中赤外 FEL の性能向上などの開発が進められている。今後、これらの開発が進むことで、より幅広い応用実験に利用可能な施設となる事が期待される。

### 参考文献

- [1] H. Zen *et al.*, "Development of IR-FEL Facility for Energy Science in Kyoto University", *Infrared Physics and Technology*, 51, 2008, pp. 382-385; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350449507001077>
- [2] H. Zen *et al.*, "Present Status and Perspectives of Long Wavelength Free Electron Lasers at Kyoto University", *Physics Procedia*, 84, 2016, pp. 47-53; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389216303042>
- [3] H. Zen *et al.*, "Present Status of Infrared FEL Facility at Kyoto University", *Proceedings of FEL2017*, 2018, pp. 162-165; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/fel2017/papers/mop050.pdf>
- [4] M. Kitaura *et al.*, "Visualizing Hidden Electron Trap Levels in Gd<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Ga<sub>3</sub>O<sub>12</sub>:Ce Crystals Using a Mid-Infrared Free Electron Laser", *Applied Physics Letters*, 112, 2018, 031112; <https://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/1.5008632>
- [5] M. Kagaya *et al.*, "Mode-Selective Phonon Excitation in Gallium Nitride Using Mid-Infrared Free Electron Laser", *Japanese Journal of Applied Physics*, 56, 2017, 022701. <http://iopscience.iop.org/article/10.7567/JJAP.56.022701/meta>
- [6] E. Ageev *et al.*, "Time-resolved detection of structural change in polyethylene films using mid-infrared laser pulses", *Applied Physics Letters*, 107, 2015, 041904; <https://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/1.4927666>
- [7] K. Yoshida *et al.*, "Experimental Demonstration of Mode-Selective Phonon Excitation of 6H-SiC by a Mid-Infrared Free Electron Laser with Anti-Stokes Raman Scattering Spectroscopy", *Applied Physics Letters*, 103, 2013, 182103; <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4827253>
- [8] F. Shishikura *et al.*, "ザリガニの眼は中赤外線が見えるの

- か”, 日大医誌, 75, 2016, pp. 140-141;  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/numa/75/3/75\\_140/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/numa/75/3/75_140/_article/-char/ja/)
- [9] R. Nagai *et al.*, “Performance of the undulator for JAERI FEL project,” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 358, 1995, pp.403-406;  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168900201689002>
- [10] S. Suphakul *et al.*, “Generation of Short Bunch Electron Beam from Compact Accelerator for Terahertz Radiation,” Proceedings of IPAC2016, 2016, pp.1757-1759;  
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ipac2016/papers/upow008.pdf>
- [11] S. Suphakul *et al.*, “Beam Dynamics Investigation for the Compact Seeded THz-FEL Amplifier,” Energy Procedia, 89, 2016, pp.373-381;  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610216300571>
- [12] H. Zen *et al.*, “Measurement of Extraction Efficiency of Kyoto University Free Electron Laser”, FROL03, in these proceedings.
- [13] Y. Qin *et al.*, “Pulse Duration and Wavelength Stability Measurements of a Midinfrared Free Electron Laser,” Optics Letters, Vol. 38, 2013, pp. 1068-1070;  
<https://www.osapublishing.org/ol/abstract.cfm?uri=ol-38-7-1068>
- [14] H. Zen *et al.*, “Present Status of Free Electron Laser Facility at Kyoto University”, Proceedings of 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2017, pp. 1347-1350;  
[https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2017/proceedings/PDF/FSP0/FSP011.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/FSP0/FSP011.pdf)
- [15] S. Krainara *et al.*, “Development of Compact THz Coherent Undulator Radiation Source at Kyoto University”, Proceedings of FEL2017, 2018, pp. 158-161;  
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/fel2017/papers/mop049.pdf>
- [16] S. Krainara *et al.*, “Mitigation of the Space Charge Effect for Improving the Performance of THz-CUR Source”, WEP007, in these proceedings.
- [17] R. Hajima *et al.*, “自由電子レーザーで駆動する高繰り返しアト秒 X 線光源”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2019.
- [18] H. Zen *et al.*, “京都大学中赤外自由電子レーザーの長マクロパルス光陰極運転に向けた光陰極励起用レーザーシステムのアップグレード”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2019.